



# ダイヤモンドを用いた量子情報素子の研究

水落 憲和

大阪大学 大学院基礎工学研究科  
准教授

## 研究の背景

近年、情報技術が通信という新しい軸を中心に置きつつある中、通信の安全性確保や環境負荷削減は社会にとって根本的な課題である。量子暗号通信の実現と発展は、絶対に解読されない暗号通信等、これらを解決する新たな通信手段となりえることが、近年原理的・学術的に示されてきている[1]。単一光子といった微弱な光を用いた絶対に解読されない暗号通信が理論的に提案されたのは1984年だが、当時は単一光子を実際に扱うことは夢物語であった。その後の進歩は著しく、近年では数十kmレベルでの距離間での量子暗号通信が実験的に実証されてきた。しかし、普及のためには現実的な通信速度への高速化と通信距離の更なる長距離化が必須である。そのためには単一光子レベルの光を効率的に生成できる単一光子源や、送られてきた量子情報を中継する量子ノードが必須となる[1]。現在開発されてきた単一光子源は、ヘリウム温度でしか動作しない素子によるものであった。また、現行の通信システムでは通信の光強度を保つために中継増幅器が使われているが、量子通信では原理的にこれを使用できない。この量子ノード素子は量子メモリーと量子信号処理回路から構成される。量子メモリーではコヒーレンスを長く保持することが要求され、量子信号処理回路では量子情報処理にとって中心的な役割を果たす「量子もつれ状態」を生成、制御することが要求される。受賞者らはダイヤモンド中のNV中心(図1)を用いてこれらの基盤技術の発展に貢献した。

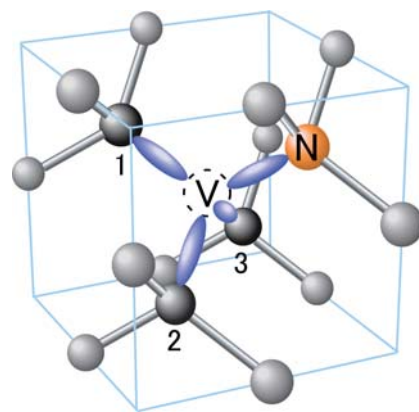
## 研究の成果

受賞者は、国内ではいち早くダイヤモンド中のNV中心(図1)に注目し、原子核スピンを持つ同位体炭素 $^{13}\text{C}$ ( $I=1/2$ )や原子核スピンをもたない $^{12}\text{C}$ ( $I=0$ )の特性を用いることによって量子情報処理のための重要な研究を行えるのではないかと着想した。NV中心では単一のことを光学検出でき(図2)、その単一のスピンを室温で操作・検出できるが、これは他の材料では現在でも不可能で、特筆すべき性質といえる。着想に基づきStuttgart大学のWrachtrup教授らのグループに対し、同位体炭素( $^{13}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}$ )濃度を変えた試料を用いた研究を提案し、共同研究を行った。試料は産業技術総合研究所グループに依頼して作製してもらった。[2, 3, 6]はドイツの測定装置で行い、[4, 5]は受賞者が立ち上げた装置を用い、筑波大学及び大阪大学で行った。[5]の超伝導素子による測定はNTT超伝導量子ビットグループが行った。一部は解説記事にて詳細が説明されている[7, 8]。受賞者は $^{13}\text{C}$ の量を増やした高品質ダイヤモンドを用いることにより、3つの最近接炭素原子(図1)のうち、2つが $^{13}\text{C}$ であるような単一NV中心を初めて観測して同定した[3]。この電子スピンと2つの核スピンを用いた3量子ビット系単一NV中心を使って、室温で量子ビット間での量子もつれ状態の生成に成功した。一般に固

体においてはコヒーレンスの保持が難しいため、それまでは、極低温において超伝導体素子を用い2量子ビットでの量子もつれ状態(ベル状態)が生成されたとの報告しかなかった。室温での2量子ビットでの量子もつれ状態(ベル状態)の生成は、固体材料中の量子ビットを用いた系では本研究成果が初めてである。また、GHZ、W状態と呼ばれる3量子ビット間の量子もつれの生成にも成功、固体中で3量子ビットの壁を室温で破ったことは特筆すべき点である。[2]

さらに、 $^{13}\text{C}$ の核スピンによる多量子ビット化により、NV中心で5量子ビットが実現可能であることを実証[3](4つの異なる単一核スピンの観測・同定と単一核スピンコヒーレンスの制御の実証)、コヒーレンス

図1 ダイヤモンド中のNV中心



Nは窒素原子でダイヤモンド格子中の炭素原子の置換位置に入っている。Vは炭素原子が抜けた空孔(V)である。1-3でラベルされた炭素原子が空孔からの最近接炭素原子と呼ばれている。

緩和機構解明[3]、室温での電子スピニコヒーレンス時間( $T_2$ )の長時間化[6](固体素子中の電子スピンのコヒーレンス時間 $T_2$ としては桁違いに長い1ミリ秒以上という最長記録の実現。)にも成功、本領域を更に発展させている。受賞者はNTT物性科学基礎研究所の超伝導グループとの共同研究で、超伝導素子における磁束量子ビットとNV中心のスピンの結合に成功した[4]。また最近、電流注入による単一光子発生を実現したが[5]、既に大きな関心もたれている。磁束量子ビットとの結合とは、磁束量子ビットの持つ高速演算の優れた点とNV中心のスピンの持つ量子メモリとしての優れた点(長いコヒーレンス時間)を組み合わせることを意味し、非常に注目されている。また、これまで電流注入による単一光子発生は半導体量子ドットにおいて極低温でのみ実現されてきたが、最近受賞者は室温でダイヤモンド半導体を用いて実現した。これは室温動作する効率の良い単一光子発生源へ道を開いたのみならず、これまで光によりスピン操作を行っていた動作を電氣的動作に置き換えることも可能にした。超伝導量子ビットでの成果と共にNV中心に「光、スピン、電荷間のインターフェイスとしての機能」を持たせる新たな基盤技術として重要と考えられる。

#### 補足説明

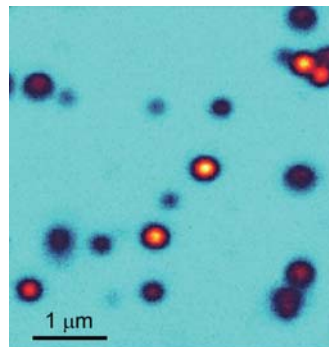
##### 単一光子

光は粒子性を持っており、単一光子は光の粒子1個を意味する。

##### 量子ビット

量子情報では、従来の情報の取扱量の最小単位であるビットの代わりに、情報を量子力学的2準位系の状態では表現する。通常のビットは0か1かのどちらかの状態しかとることができないが、量子ビットは、0と1だけでなく0と1の状態の量子力学的重ね合わせ状態をとることができる。本研究では電子と核が持つ量子力学的な自由度の一つであるスピンを量子ビットとして用いている。

図2 NV中心の共焦点レーザー蛍光顕微鏡像(室温)



蛍光波長が635-750nm付近の発光を表示している。赤で示されている輝点が単一NV中心で、強度の濃淡は励起レーザー光の焦点深さからの距離等に依る。このように手に取るようにNV中心を一つ一つ手に取るように室温で観測できる。

## 将来の展望

技術の進歩は目覚ましく、量子暗号通信については、基本的なシステムが既に海外の数社のベンチャー企業から販売され、日本においても大手の電機メーカーが関心を持ち、基盤技術開発を行っている。将来の展望としては、まずは近距離ではあっても極限的な通信安全性・精度を実現するハイエンド技術として利用されてゆくと期待している。量子暗号通信における今後の課題としてまず挙げられるのは通信距離と速度である。効率の良い単一光子発生素子や量子中継器の実現が、それらの限界を打ち破るものと受賞者らは考え、またそれらがダイヤモンドで実現できないかと夢見ている。20

数年前に量子暗号通信は夢物語と考えられていたが、近年量子情報素子の研究が活発になされ進歩も目覚ましく、我々も予期しないような技術進歩が近い将来になされるかもしれない。一研究者としてダイヤモンドによる量子情報技術発展への貢献ができればと考え、日々励んでいるところである。

本研究は、産業技術研究所の山崎グループ、シュトゥットガルト大学のWrachtrup教授グループ、NTT物性基礎研究所仙場グループ等との共同研究に基づくものです。また科学技術研究機構(さきがけ)に援助をいただき日本での研究を立ち上げることができました。本受賞は関係者の皆様方のご支援の賜であり、ここに深く感謝いたします。

## References(参考文献)

- [1] 佐々木雅英、応用物理、79巻、p. 112-118、2010と引用文献。
- [2] P. Neumann\*, N. Mizuochi\*, F. Rempp, P. Hemmer, H. Watanabe, S. Yamasaki, V. Jacques, T. Gaebel, F. Jelezko, J. Wrachtrup. Science, 320, 1326 (2008).
- [3] N. Mizuochi, P. Neumann, F. Rempp, J. Beck, V. Jacques, P. Siyushev, K. Nakamura, D. Twitchen, H. Watanabe, S. Yamasaki, F. Jelezko, J. Wrachtrup, Physical Review B, 80, 041201(R) (2009). (Editors' suggestion)
- [4] X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W. J. Munro, Y. Tokura, M. S. Everitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi, K. Semba, Nature, 478, 221 (2011).
- [5] N. Mizuochi, T. Makino, H. Kato, D. Takeuchi, M. Ogura, H. Okushi, M. Nothaft, P. Neumann, A. Gali, F. Jelezko, J. Wrachtrup, S. Yamasaki, submitted.
- [6] G. Balasubramanian, P. Neumann, D. Twitchen, M. Markham, R. Kolesov, N. Mizuochi, J. Isoya, J. Achard, J. Beck, J. Tissler, V. Jacques, F. Jelezko, J. Wrachtrup, 8, 383 (2009).
- [7] 水落憲和「ダイヤモンド中の単一NV中心を用いた量子情報処理」日本物理学会誌、vol. 64, no. 12, 910-918, 2009.
- [8] 水落憲和「ダイヤモンド中のNV中心の単一スピニコヒーレンス制御」固体物理、2010年1月号、vol. 45, p. 27-36